

УДК 621.3.011.74:519.613

**А.Д. БЛАЩЕНКО**, научн. сотр., ИИПТ НАН Украины, Николаев;  
**Н.П. ГОЛОВИНА**, аспирант, ИИПТ НАН Украины, Николаев;

## **К РАБОТЕ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ В РЕЖИМЕ, БЛИЗКОМ К СОГЛАСОВАННОМУ**

Методом чисельного моделювання досліджено вплив роботи імпульсного електророзрядного джерела енергії у режимі, що близький до узгодженого, для розрядноімпульсних технологій, що використовують високовольтний пробій у воді. З використанням експериментальних даних за умов вищевказаного режиму роботи енергоджерела побудовано графічні залежності, що демонструють вплив геометрії електродної системи та електричної ємності накопичувача на передпробивні втрати енергії.

According to the method of numerical modeling the investigation of pulse electrodischarging energy source operation in mode, which is almost agreed, for discharge technologies based on high-voltage breakdown in water. With using of experimental data for considered energy source operation mode graphical dependences, which show the geometry of electrode system and electrical capacity influence on energy losses in pre-breakdown stage, are described.

Методом численного моделирования исследовано влияние работы импульсного электроразрядного источника энергии в режиме, близком к согласованному для разрядноимпульсных технологий, которые используют высоковольтный пробой в воде. С использованием экспериментальных данных при условиях вышеуказанного режима работы энергоисточника построены графические зависимости, демонстрирующие влияние геометрии электродной системы и электрической емкости накопителя на предпробивные потери энергии.

Эффективность любой разрядноимпульсной технологии (РИТ) определяется режимом работы емкостного импульсного электроразрядного источника энергии (ИЭРИЭ), обеспечивающим выделение максимально возможной запасенной энергии в течение первой полуволны разрядного тока, то есть режимом, близким к согласованному. Для реализации такого режима сопротивление нагрузки, то есть сопротивление плазменного канала разрядного промежутка, должно быть достаточно большим (в линейных цепях оно должно приближаться к волновому сопротивлению контура  $\sqrt{L/C}$ ). В ИЭРИЭ этот режим может быть достигнут путем увеличения длины разрядного промежутка при неизменном зарядном напряжении. При этом в РИТ, использующих высоковольтный пробой, существенным образом возрастают предпробивные потери энергии  $W_n$  и уменьшается напряжение пробоя  $Unp$ . Свыше определенной величины разрядного промежутка пробой перестает реализовываться и вся запасенная в накопителе энергия сливается в водную среду технологического объема, то есть в электрическом разряде реализуется только предпробивной режим, который для РИТ не представляет практического интереса.

**Цель работы:** провести исследования, направленные на определение параметров ИЭРИЭ, обеспечивающих режим работы, близкий к согласованному, для РИТ, использующих высоковольтный пробой в воде.

В результате ранее проведенных исследований [1] было показано, что предпробивные потери энергии можно представить как:

$$W_n = \frac{2 \cdot \sqrt{\pi S_e} \cdot \alpha \cdot l \cdot \sigma \cdot U_3^2 \cdot (1 + 40l)}{(U_3 - U_0)^2} = f \frac{CU_3^2}{2}, \quad (1)$$

где  $S_e$  – площадь оголенной поверхности электрода, м<sup>2</sup>;  $\alpha = 0,36 \cdot 10^6$  – постоянная, В<sup>2</sup>·с/м;  $\sigma = 0,055$  – удельная электропроводность воды, (Ом·м)<sup>-1</sup>;  $U_0 = 1,82 \cdot 10^6 \cdot r_e \cdot \ln(4 \cdot l/r_e)$  – минимальное пороговое напряжение перехода теплового пробоя в лидерный, В;  $U_3$  – зарядное напряжение, В;  $r_e$  – радиус оголенной части электрода, м;  $l$  – длина межэлектродного промежутка, м;  $C$  – емкость накопителя энергии, Ф;  $f$  – доля энергии от запасенной, затрачиваемой на формирование канала разряда (коэффициент предпробивных потерь энергии), откуда зарядное напряжение –

$$U_3 = \sqrt{\frac{4\sqrt{\pi S_e} \cdot \alpha \cdot l \cdot \sigma \cdot (1 + 40l)}{f \cdot C}} + U_0. \quad (2)$$

При этом напряжение пробоя [3] –

$$U_{np} = \sqrt{1 - f} \cdot \left[ \sqrt{\frac{4\sqrt{\pi S_e} \cdot \alpha \cdot l \cdot \sigma \cdot (1 + 40l)}{f \cdot C}} + U_0 \right]. \quad (3)$$

Как уже упоминалось, минимальное пороговое напряжение  $U_0$ , отражая геометрию электродной системы, а именно – радиус электродов  $r_e$  и величину межэлектродного промежутка  $l$ , является, по сути, минимально возможным напряжением пробоя. При этом коэффициент предпробивных потерь  $f$  будет максимально достижимым, а зарядное напряжение  $U_3$  – минимально допустимым, при которых еще возможен пробой такого межэлектродного промежутка. В этой связи вполне логично критерием работы ИЭРИЭ в режиме, близком к согласованному, принять равенство напряжения пробоя (3) минимальному пороговому напряжению перехода теплового пробоя в лидерный:

$$U_{np} = U_0. \quad (4)$$

Учитывая то, что пороговое напряжение  $U_0$  может быть представлено в виде функции длины разрядного промежутка  $l$ , то из вышеприведенных выражений при заданной геометрии электродной системы (радиуса электрода  $r_e$ , площади оголенной его поверхности  $S_e$ ) и электропроводности воды  $\sigma$  коэффициент предпробивных потерь  $f$  и соответствующее зарядное напряжение  $U_3$  могут быть также представлены в виде функции от  $l$ .

Для проведения расчета были использованы данные физического эксперимента [2] для разрядного контура с емкостью накопителя  $C = 3,22$  мкФ, индуктивностью контура  $L = 2,15$  мкГн при напряжении пробоя  $U_3 = 39,8$  кВ.

При этом было принято: проводимость воды  $\sigma = 0,055 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$ , радиус электрода  $r_e = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , длина оголенной части электрода  $l_e = 40 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

Из условия (4), при подстановке в него выражения (3), может быть определен максимально возможный коэффициент предпробивных потерь  $f$  как функция длины межэлектродного промежутка (рис. 1, а). Используя этот коэффициент в выражении (3), получим минимально допустимое зарядное напряжение как функцию длины разрядного промежутка (рис. 1, б), способное реализовать электрический пробой при заданной геометрии электродной системы, проводимости воды и емкости накопителя.

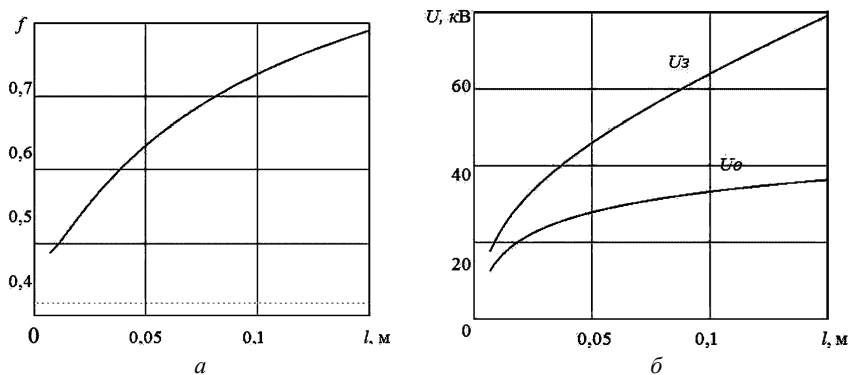


Рисунок 1 – Максимально возможный коэффициент предпробивных потерь (а) и минимальное допустимое зарядное напряжение (б) в функции длины разрядного промежутка.

В электродных системах ИЭРИЭ, применяемых в РИТ, поперечное сечение и величина оголенной поверхности используемых электродов определяются, во-первых, способностью электрода противостоять многократным импульсным механическим нагрузкам, возникающим при электрическом взрыве в воде, и, во-вторых, ресурсом работы электродной системы без замены электродов, определяемым технологическим процессом. При этом, как правило, в технологических устройствах используется водопроводная вода с электропроводностью, соответствующей данному региону. Электрическая емкость накопителя ИЭРИЭ может варьироваться в достаточно широких пределах с точки зрения как запасаемой энергии, так и временных характеристик процесса. В этой связи, в зависимости от конкретной технологии, радиус поперечного сечения применяемых электродов варьируется в пределах от 2 до 5 мм. Длина оголенной части при этом может быть от 20 до 100 мм.

Вышеуказанные параметры существенным образом сказываются на величине предпробивных потерь [1] и могут вызвать сложности на пути к достижению оптимального режима работы конкретного технологического устройства, в частности, в достижении режима работы ИЭРИЭ, близкого к со-

гласованному.

Получение каких-либо обобщающих аналитических выражений или графических зависимостей затруднено, но на основании вышеприведенных рассуждений (рис.1) можно проследить тенденцию изменения предпробивных потерь и зарядного напряжения при изменении любого из рассматриваемых параметров.

Пороговое напряжение  $U_0$  представим как функцию радиуса электрода и длины разрядного промежутка в более уточненном виде:

$$U_0(r_e, l) = 1.83 \cdot 10^6 \cdot \frac{\ln \left( \frac{\sqrt{1 + \frac{l}{r_e}} + \sqrt{\frac{l}{r_e}}}{\sqrt{1 + \frac{l}{r_e}} - \sqrt{\frac{l}{r_e}}} \right)}{\sqrt{\frac{l}{r_e}} \cdot \sqrt{1 + \frac{l}{r_e}}} \cdot l \quad (5)$$

и построим зависимости  $U_0(l)$  при различных радиусах электрода  $r_e$  (рис. 2).

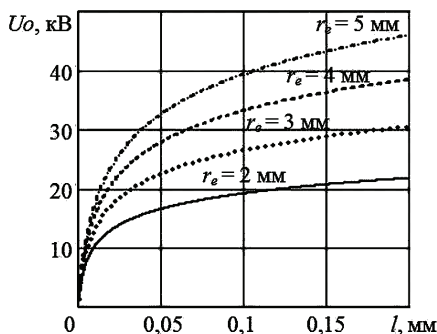


Рисунок 2 – Пороговое напряжение  $U_0$  в функции длины разрядного промежутка  $l$  для разных значений радиуса электрода  $r_e$

Как видно из полученных зависимостей (рис. 2), с увеличением толщины электрода пороговое напряжение увеличивается.

Максимально возможный коэффициент предпробивных потерь  $f_{max}$  как функция длины разрядного промежутка для вышеиспользованных параметров (рис. 2) определялся при соответствующей подстановке выражений (3) и (5) в виде корней уравнения:

$$Unp - U_0 = 0. \quad (6)$$

При этом, как видно (рис. 3, а), с ростом толщины электрода коэффициент предпробивных потерь уменьшается. Это объясняется тем, что в данном случае предпробивные потери  $Wn$  с увеличением толщины электрода растут медленнее, чем растет запасаемая энергия. В то же время минимально допус-

тимое зарядное напряжение (рис. 3, б) в зависимости от толщины электрода растет аналогично пороговому напряжению.

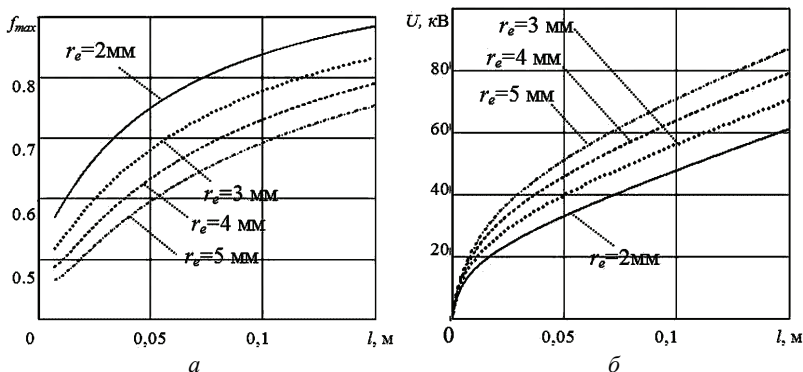


Рисунок 3 – Максимально возможный коэффициент предпробивных потерь (а) и минимально допустимое зарядное напряжение (б) в функции длины разрядного промежутка при разных значениях радиуса электрода

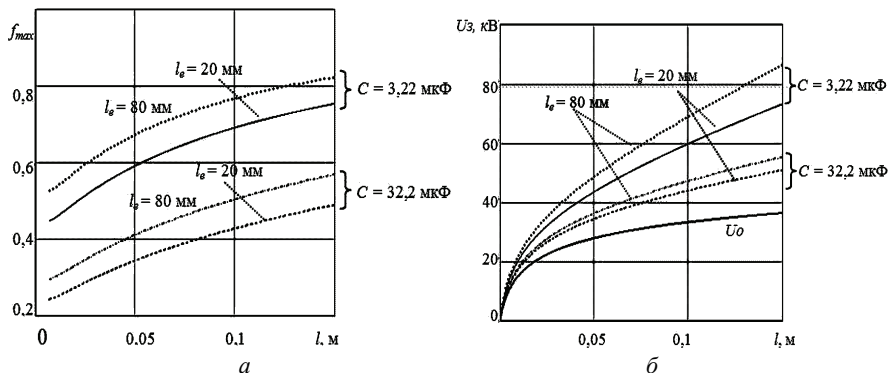


Рисунок 4 – Максимально возможный коэффициент предпробивных потерь для заданных условий (а) и минимально допустимое зарядное напряжение при изменении оголенной поверхности электрода и емкости накопителя (б).

Представляет интерес определение максимально возможного коэффициента предпробивных потерь  $f_{max}$  и минимально допустимого зарядного напряжения  $U_z$  в зависимости от длины оголенной поверхности электрода  $l_e$  и емкости накопителя  $C$ . Примем радиус электрода  $r_e$  равным 4 мм, как наиболее распространенный в устройствах РИТ. Одновременно примем два значения длины оголенной поверхности – 20 и 80 мм, а также два значения величины емкости – 3,22 и 32,2 мкФ. Электропроводность воды принимаем прежней –  $\sigma = 0,055$  (Ом·м)<sup>-1</sup>.

На рис. 4, а представлены зависимости максимально возможного коэффициента предпробивных потерь  $f_{max}$  от длины разрядного промежутка для вышеуказанных условий. Как видно, увеличение оголенной поверхности электродов приводит к росту предпробивных потерь, а рост емкости накопителя – к их уменьшению.

Как показывают зависимости, представленные на рис. 4, б минимально допустимое, для обеспечения пробоя, зарядное напряжение  $U_z$  (в сравнении с пороговым напряжением  $U_0$ ) с ростом оголенной поверхности электрода должно расти. В то же время увеличение емкости накопителя приводит к существенному уменьшению минимального зарядного напряжения и при этом изменение оголенной поверхности сказывается незначительно.

**Выводы.** 1. Полученные результаты позволяют утверждать, что рассмотренный режим работы ИЭРИЭ, близкий к согласованному для РИТ, использующих высоковольтный пробой в воде, характеризуется недопустимо большими ( $>> 50\%$ ) предпробивными потерями энергии. Кроме того, такой режим крайне нестабилен в реализации пробоя и не гарантирует выделение запасенной в накопителе энергии в течение импульса тока. Поэтому такой режим нельзя принимать как оптимальный для РИТ. 2. В то же время показанная возможность построения приведенных зависимостей по конкретным исходным данным может служить ориентиром для оптимизации создаваемых ИЭРИЭ. Очевидно, дальнейшие исследования в направлении оптимизации режима работы электроразрядных устройств для различных РИТ должны, в первую очередь, опираться на ранее полученное условие минимума предпробивных потерь энергии [3], развивая его в сторону режима, близкого к согласованному.

**Список литературы:** 1. Кужекин И.П. Исследование пробоя жидкости в неоднородном поле при прямоугольных волнах напряжения / И.П. Кужекин // Журн. техн. физики. – 1966. – Т. 36, вып. 12. – С. 2125-2130. 2. Кривицкий Е.В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде / Е.В. Кривицкий, В.В. Шамко. – К.: Наук. думка, 1979. – 208 с. 3. Вовченко А.И. Синтез емкостных энергоисточников для высоковольтных электротехнологических установок с учетом предразрядных процессов / А.И.Вовченко, Н.П. Дивак / Вестник НТУ «ХПИ». – 2010. – № 18. – С. 61-67.

*Поступила в редакцию 20.09.2011.*